



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño y construcción de un prototipo UAV para la vigilancia de personas

Jonathan Leonard Crespo Eslava

Sebastian Diaz Martinez

Esperanza Margarita Palacios Vargas

Carlos Andrés Terán Jiménez

Ing. Manuel Amézquita Pulido

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Proyecto Aplicado de Ingeniería
Bogotá, Colombia
Marzo, 2017

RESUMEN

En el presente informe mostramos el proceso llevado a cabo para desarrollar la fase de diseño de detalle de nuestro proyecto, analizando cada una de las etapas que contiene: La definición y el establecimiento de la arquitectura del equipo máquina, en donde definimos la estructura general del PROTOTIPO UAV PARA VIGILANCIA (y seguridad) DE PERSONAS (en espacios abiertos), la identificación de sus componentes independientes tanto comerciales (selección de diseño) como manufacturados a medida, las restricciones dimensionales a las que está sujeto y las interfaces generadas a manera de resultado. También presentamos la generación de los modelos CAD a partir de los cálculos matemáticos y análisis físicos ejecutados para la estructura aerodinámica de soporte del prototipo.

Finalizamos dando algunas recomendaciones y conclusiones en esta etapa del proyecto, teniendo en cuenta el proceso del diseño de la estructura anteriormente nombrada, su configuración topológica, los cálculos de su desempeño aerodinámico y la determinación puntual de sus geometrías.

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS

LISTADO DE TABLAS

SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA EMPLEADA

INTRODUCCIÓN

Página

1. DISEÑO A NIVEL DE SISTEMA.....	1
2. DISEÑO DE DETALLE	2
2.1 Selección de componentes normalizados.....	2
2.2 Selección de materiales y técnicas de producción para componentes personalizados.....	10
2.3 Definición de las restricciones espaciales.....	15
2.4 Identificación de piezas independientes.....	31
2.5 Desarrollo y conexión de las interfaces funcionales.....	32
3. FORMULACIÓN Y SÍNTESIS DE MODELOS.....	33
3.1 Modelos gráficos y sólidos (CAD).....	33
3.2 Modelos matemáticos y numéricos.....	34
3.3 Modelos físicos e instalaciones experimentales.....	36
4. PROCESO DE EVALUACIÓN DEL DISEÑO DETALLADO.....	37
4.1 Evaluación del producto en cuanto a funciones y desempeño.....	37
4.2 Evaluación del producto por factores (DfX).....	39
4.2.1 Evaluación del diseño orientado a fabricabilidad	
4.2.2 Evaluación del diseño orientado a ensamblabilidad	
4.2.3 Evaluación del diseño orientado a confiabilidad	
4.2.4 Evaluación del diseño orientado a seguridad (AMFE)	
4.2.5 Evaluación del diseño orientado a impacto ambiental y reciclaje	
4.3 Mejoras al diseño detallado como resultado del proceso de evaluación.....	40
Conclusiones y recomendaciones	41
Referencias bibliográficas	42

LISTADO DE FIGURAS

LISTADO DE TABLAS

SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA EMPLEADA

°C: Grados Celsius.

AC: Corriente alterna.

CO: Monóxido de carbono.

CFD: Dinámica de fluidos computacional (por sus siglas en inglés).

DC: Corriente directa.

ESC: Control electrónico de velocidad (por sus siglas en inglés).

FPV: Visión en primera persona (por sus siglas en inglés).

GPS: Sistema de posicionamiento global (por sus siglas en inglés).

LiPo: Batería de polímero de Litio (se describe por un acrónimo en inglés sobre el material que la forma).

mAh: Mili Amperios hora.

mW: Mili Watts.

ppm: Partes por millón.

RF: Radio frecuencia.

UAV: Vehículo aéreo no tripulado (por sus siglas en inglés).

V: Voltios.

INTRODUCCIÓN

El diseño de detalle es la fase posterior a la de diseño conceptual, en la que este se refina y se materializa en planos, modelos CAD y otras especificaciones técnicas aterrizadas a la realidad de la implementación. Es de vital importancia para el buen rumbo del proyecto definir completamente el diseño detallado del equipo máquina, de manera que se identifiquen adecuadamente sus subsistemas, piezas independientes, y sus interfaces; Dado que de esta fase depende una parte muy considerable del éxito del proyecto.

Para nuestro proyecto, PROTOTIPO UAV PARA LA VIGILANCIA DE PERSONAS, primero se identificaron los subsistemas (dada la metodología de diseño mecatrónico que rige este diseño, es conveniente y preferible realizar una división interna orientada a los sistemas, como sectores diferenciados delimitados por sus funciones, sean estas bien tangibles o intangibles, y no como conjuntos de máquina, que son sistemas armoniosos delimitados por la interacción parcial de sus partes, puesto que esta se integra más a la concepción del entregable), tales como el sistema de comunicaciones, el sistema de imagen/video y el sistema de control de movimiento, entre otros.

Partiendo de las cotizaciones realizadas sobre el mercado, de un análisis exhaustivo de la literatura científica disponible y de la información técnica aportada por los fabricantes sobre sus productos, se escogieron los componentes estándar (como por ejemplo el giroscopio, el sensor de CO, y los módulos de RF) y se definieron los elementos a desarrollar, físicos y no-físicos (la estructura aeronáutica y los códigos computacionales de operación del equipo, para nuestro caso), cada una con sus restricciones y requerimientos respectivos, material, y proceso de manufactura.

Finalizado este procedimiento, realizamos algunas reflexiones y una evaluación del diseño propuesto bajo el rigor de los factores de diseño, cerrando con la propuesta de algunas mejoras sobre este, aunque no todas estas pudieron ser implementadas.

1. DISEÑO A NIVEL DE SISTEMA

La descomposición del proyecto por medio de sistemas permite realizar una adecuada descripción y desarrollo de las utilidades, el propósito general a cumplir es propiciar una orden general (valga la redundancia) que permita afinar los dispositivos sin ocuparse en detalles relacionados con otros. Para el análisis de los componentes del UAV se han separado por las *utilidades* que proporcionan al proyecto. A continuación, se relacionan las secciones del proyecto no solamente con sus funciones, sino con los componentes que permiten desarrollar esas funciones.

- 1) Navegación: Es uno de los ítems más importantes dentro del diseño, dado que pertenece a la realimentación de un sistema de control que proporciona la estabilidad y el comportamiento deseado sobre el desplazamiento del dron. Cada uno de estos componentes proporciona información valiosa en cuanto al posicionamiento del vehículo.
 - a. GPS: Es la referencia absoluta del dron, proporciona una ubicación general del dispositivo sobre un plano, lo cual resulta muy conveniente en el momento de realizar *tracking* (seguimiento) a un objetivo en movimiento.
 - b. Giroscopio: El avance del vehículo aéreo está dado por el nivel de inclinación que puede generarse entre el plano principal del chasis (donde se soportan los motores) y el nivel del piso, por tanto, la exploración de herramientas como el giroscopio se hace completamente indispensable para la etapa de control de la velocidad, la posición y el ángulo de desplazamiento del dron.
 - c. Altimetro: Cualquier navegación aérea requiere de un componente adicional a cualquier navegación terrestre, dado que tiene que tenerse en cuenta la altura a la cual se encuentra el dispositivo, esto con el propósito principal de cumplir las regulaciones impuestas por la entidad encargada por el ministerio de transporte, la AeroCivil.
- 2) Transmisión de video: A bordo del vehículo se contará con una cámara que permitirá identificar, por medio de una transmisión instantánea; Una perspectiva en primera persona del vuelo, permitiendo realizar tareas de vigilancia, y fundamentalmente, realizando el vuelo del dron a partir de un lugar remoto. La proyección de la perspectiva está asociada a unos goggles (antiparras) con una pantalla, aunque también puede asociarse otro proyector, dependiendo de la aplicación.

- a. Transmisor: Es el dispositivo encargado de enviar la señal de video capturada por la cámara, que posteriormente ha sido codificada; por medio de la antena que se le asocia. El transmisor debe ser altamente protegido, debido a su importante aporte y a su delicada naturaleza, además de cuidar posibles interferencias magnéticas asociadas al funcionamiento de otros dispositivos, como la batería.
 - b. Antena: La transmisión de video del dispositivo requiere el uso de un sistema de transmisión, compuesto por al menos tres componentes. La antena es uno de ellos, dado que aumenta el alcance del sistema.
 - c. Cámara: Por medio de la lente, aísla el sistema de captura y define el rango del sistema. Para este, la cámara es el sensor, codifica los valores del entorno por medio de una señal que posteriormente se comparte con una pantalla a través de la emisión de RF del transmisor a bordo del dron.
- 3) Unidad de carga: Aquí es fundamental el uso de una fuente que distribuye energía, esta debe tener entre otras cosas dos atributos principales: Que la carga que contenga sea suficiente para el tiempo de vuelo definido por los valores de operación dados por el cliente (1/2 hora), y que su peso no exceda la disponibilidad estimada para la batería (relación aceptable peso-carga). El sistema de carga se compone de la fuente (una batería LiPo), un indicador de carga, reguladores de tensión y cables de poder.
- a. Batería: La batería se limita inmediatamente a un tipo debido a que de los tipos de tecnología disponibles e implementables es el que proporciona las mejores ventajas, relacionadas con el almacenamiento de energía, el peso de la alternativa y el nivel de carga que proporciona. Es importante cuidar a toda costa de la vida útil de la batería, debido a que de la calidad de la energía que alimenta los otros componentes depende la durabilidad de los mismos. En conclusión, una buena batería, alimenta de buena forma el sistema.
 - b. Reguladores: Debido a que la calidad de la señal de energía que distribuye la batería a los componentes no se puede confirmar en todo momento como suficiente correcta y constante para la alimentación del dispositivo, se utiliza un dispositivo adicional que mantiene unos rangos de variación de la alimentación al mínimo, con el objeto de contar con una fuente más estable.
 - c. Cable de poder: La circulación de esta energía que proporciona toda la unidad de carga debe ser distribuida entre los diferentes sistemas, lo cual requiere la conexión física entre fuente y carga. Es de cuidado la

ubicación topológica de estos cables asociados por entre los dispositivos del dron, debido a que las líneas que alimentan no pueden cruzarse con las líneas de transmisión, debido a que generan un campo asociado con ruido.

- d. Indicador de carga: Una de las particularidades más desfavorables para este tipo de baterías es su delicado *estilo de vida*, que consiste en emplearlas de forma continua mientras conserve un determinado nivel de energía. Cuando este nivel sea alcanzado, la batería debe ser inmediatamente cargada, pues de otro modo se expone a que su vida útil se vaya reduciendo. El indicador de carga cumple con el propósito de hacer visible para el usuario cuando el nivel de carga ha disminuido demasiado como para seguir utilizándose.

- 4) Módulo de comunicación: El dron no es un sistema completamente autónomo en sí mismo, pues depende de unos medios en tierra para realizar el control y la interpretación de las señales. La principal ventaja es la reducción de los dispositivos a bordo, por tanto, un menor peso, y mayor autonomía.

Sin embargo, esta reducción tiene el costo de la transmisión y recepción de información. Y para llevar a cabo este propósito, se hace uso de dos módulos de gran alcance. Uno disponible en tierra, y el otro a bordo del dispositivo.

- a. Antena RF: Cumple el mismo propósito que la antena en la transmisión de video, una significativa ganancia en el rango del dispositivo. Aunque hay alternativas de transmisión por RF que proporcionan comunicación sin antena, el alcance es muy corto, y para aplicaciones de control de un dron, entre más alcance, más apropiado.
- b. Módulo de procesamiento: Las señales que se transmiten en uno u otro sentido están sujetas a la interpretación de estos dispositivos, que se comunican entre sí por protocolo serial. Las señales que son detectadas y amplificadas por la antena posteriormente son interpretadas por unidades de procesamiento (en el caso de la tierra, el computador; en el caso del vehículo, la tarjeta) y utilizadas para control e información de la operación.

- 5) Unidad del procesamiento: La tarjeta utilizada para el análisis de señales es en los dos casos (puesto en tierra y vehículo en el aire) es la misma, para propósitos de compatibilidad. La tarjeta **Arduino MEGA 2560** hace el papel de procesador en el aire, gobierna el comportamiento del vehículo y codifica la información relevante a la operación, por ejemplo, en el caso de los sensores de navegación y que cumplen

funcionalidades en particular. En concreto, las funciones de la unidad de procesamiento incluyen:

- a. Regular la alimentación de los motores del UAV: Desde tierra se configura la velocidad de cada motor para generar un cierto valor de empuje (thrust) y obtener elevación en cada una de las esquinas del dron. Posteriormente, la señal de control se envía por medio del transceptor RF hacia el vehículo, que se interpreta, se configura y se ejecuta para cumplir con las demandas de control impuestas por el usuario.
 - b. Información de sensores: La lectura de las señales ambientales detectadas por los sensores debe transmitirse tras la interpretación del transductor (sensor de CO, por ejemplo). Dentro del procesador, esta señal se codifica y se incluye en la trama de un protocolo de comunicación para ser recibida por otro transceptor en tierra.
 - c. Información de navegación: Para identificar la posición actual del dispositivo, y realizar un control más fiable del vehículo, es vital la inclusión de información referente. Durante cada transmisión resulta por tanto conveniente realimentar con esta información al sistema de control, para permitir ubicar el dispositivo en un espacio claramente delimitado. La información de posición es relevante al sistema para evitar que el dron salga de los límites de control que permite cubrir el radio control.
 - d. Envío de información: La adquisición de los valores de control para los motores, la información de los sensores y la información de navegación se comunica por medio del protocolo serial. La gestión de este protocolo está dada por el procesador a bordo, que administra el manejo de la información a concatenar para la realimentación de la información del UAV.
- 6) Sensor de CO: Esta es una categoría adicional en la que se incluyen los dispositivos que cumplen con las funciones dedicadas del dispositivo. El vehículo cuenta con un sensor dedicado a la lectura de los niveles de CO en el ambiente, para la detección de combustión de material, preferiblemente vegetal.

Sistemas en tierra - Además de los recursos a bordo del vehículo, que son la mayoría; se requieren dispositivos de recepción en tierra, esto con el propósito de interpretar por medio de un sistema de procesamiento más robusto, las señales provenientes de la lectura de sensores y navegación. El equilibrio del vehículo depende significativamente de la interpretación de las variables de vuelo, es por eso que la interpretación de las señales es significativa en la programación.

- 1) Recepción de video: Todo el conjunto relacionado con la transmisión de video es dependiente con respecto a los demás sistemas, esto debido a que comercialmente este componente siempre se propone como un dispositivo independiente. Para la recepción se cuenta con una antena para la recepción muy similar a la que se dispuso a bordo en el vehículo, además de utilizar un receptor que sintoniza toda la gama de frecuencias configurable para el sistema, dependiendo de la necesidad.
 - a. Antena: Este componente recibe y amplifica el contenido proveniente de la antena transmisora. Del medio provienen una señal de RF en la que se dispone la información que proviene de la cámara y su módulo de transmisión respectivo.
 - b. Módulo de recepción: El sintonizador de las frecuencias se requiere para decodificar la señal de RF proveniente del medio, y disponerla inmediatamente en una salida de A/V. Dado que un mismo dispositivo de recepción puede detectar las señales de transmisión de muchas fuentes, el canal y la frecuencia asociadas son configurables. Este dispositivo es uno de los componentes fundamentales del sistema de FPV (First Person View).
 - c. Sistema de alimentación: Para la alimentación del módulo de recepción se requiere una alimentación determinada por el fabricante, las especificaciones se muestran en el conector. Un adaptador de pared o un sistema de alimentación independiente será suficiente para la energización del módulo receptor.
- 2) Módulo de comunicación: Para programar la velocidad de los motores (y por tanto el empuje) se acude a la comunicación por medio de RF con el procesador remoto a bordo del UAV, para ello se requiere un transceptor por medio del cual no solamente se programan los motores a bordo, sino que se recibe información de la operación del vehículo y de los sensores.
 - a. Antena: Aumenta el rango de detección del módulo de transcepción, tal como lo hace el módulo en el aire.
 - b. Módulo y procesamiento: La señal que llega a la antena, posteriormente es interpretada por el módulo serial que está conectado a la antena.
 - c. Sistema de alimentación: Dado que, en el aire toda la alimentación consiste en la batería LiPo, no hay que preocuparse por la alimentación. En tierra la alimentación del transceptor está proporcionada por la salida de energía de la tarjeta. Dado que el módulo de transcepción no es

particularmente un circuito de potencia, no hace falta poner en medio un shield para la protección de la tarjeta o del computador.

2. DISEÑO DE DETALLE

2.1 SELECCIÓN DE COMPONENTES NORMALIZADOS

1. Selección de Sistema de Potencia.

Del estado del arte y referencias bibliográficas, un patrón para estos UAVs de pequeña escala es el uso de motores eléctricos tipo brushless a los cuales se le acoplan hélices, dispositivo que usa la potencia rotativa del motor para generar una diferencia de presiones en un medio aéreo y generar la una fuerza de propulsión. Se usa para energizar los motores baterías portátiles de poco peso y tamaño de Polímero de Litio (las llamadas LiPo) y controladores electrónicos de velocidad (ESC)

Están también los motores de combustión, pero para esta aplicación son contraproducentes. Primero, porque su energía se basa en las combustiones de productos como el acetileno, propano o el gas natural; que son inflamables y que poseen una densidad alta, lo que significa más peso para el dron y una perturbación adicional por sus movimientos. Segundo, la tecnología es costosa y difícil acoplarse a los sistemas electrónicos usados. Y tercero, sus tamaños mínimos son muchas veces más grandes que los de cualquier UAV comercial. Por ejemplo, un dron que usa motor de combustión son aquellos de uso militar.

Justamente por eso los brushless son los tipo a motor a usar por sus ventajas [1]

- Mayor eficiencia (menos pérdida por calor)
- Mayor rendimiento (mayor duración de las baterías para la misma potencia)
- Menor peso para la misma potencia
- Conmutación electrónica basada en sensores de posición de efecto Hall
- Requieren menos mantenimiento al no tener escobillas
- Relación velocidad/par motor es casi una constante
- Mayor potencia para el mismo tamaño
- Mejor disipación de calor
- Rango de velocidad elevado al no tener limitación mecánica.
- Menor ruido electrónico (menos interferencias en otros circuitos)

En cuanto a desventajas son su costo sobre todo porque al ser motores de corriente alterna requieren controladores especiales, pero la gran cantidad de marcas y gama hace de muchos ahora asequible a consumidores particulares.

Para el dimensionamiento del motor se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Razón empuje-peso. Peso del motor.
- Tamaño y Kv.
- Voltaje de alimentación (Lipo a usar).
- Tipo de Hélice a acoplar.
- Driver de Potencia.
- Costo.
- Disponibilidad de distribuidor.
- Empuje y Potencia.

El siguiente diseño o selección se hizo por catálogo mediante la ayuda del software Drive calculator para verificar escogidos nuestro parámetro

1.1 Razón empuje-Peso. Peso del motor.

Como el diseño es cuadricoptero requerimos un total de 4 motores para asegurar la estabilidad. Del diseño de la estructura que se explica más adelante, tenemos un aprox de 625 g para carga de la estructura

$$\text{Empuje de cada motor} = (625 + 300 + 200) \text{ g} / 4 = 281.25 \text{ g}$$

Se determinará entonces que el peso que deben levantar los 4 motores sea el doble o más de este, es decir enfocado como mínimo a levantar 2.2 kg (concorde con especificaciones de ingeniería determinadas) para evitar problemas con la estabilización en aire.

Para el cálculo se considera un peso de un motor desde los 50 g en adelante y un peso de la batería de aprox 300 gramos según recomendaciones de distribuidores [3], menor peso indica que los motores están hechos para drones de carrera o de escala pequeña y por ende torques bajos, con lo cual su capacidad de carga no será mucha.

1.2 Tamaño del motor y KV

El tamaño del motor se especifica con un número de 4 dígitos, donde los dos primeros dígitos indican el ancho del estator y los últimos dos el largo. A mayor tamaño del motor mayor torque podrá ofrecer, sin embargo el peso aumentará. Para un peso de motor de 50 g , del catálogo existente en distribuidoras como HobbyKing [14] este peso se corresponde con un tamaño 2212.

El Kv se refiere a la velocidad de rotación en RPM que generaría con un voltio sin carga. Este valor decrece por el acople con la hélice que actuará como resistencia. Con las hélices que se seleccionen en busca de mayor capacidad de carga los Kv deben ser más bajos porque se requiere un torque mayor para su giro. En la tabla 1 muestra una aproximación basada en el uso de una Lipo de 4S (unos 14.8 V) para seleccionar el tamaño de hélice y Kv a partir del tamaño del marco.

El marco del dron tiene unos 500 mm por lo que se recomendaría usar una hélice de 9", un Kv MENOR A 1000, que coinciden con el tamaño seleccionado de motor. El Kv que buscaremos estará entre los 900 y 1000 siendo el valor a asumir 920.

Frame Size	Prop Size	Motor Size	KV
150mm or smaller	3" or smaller	1306 or smaller	3000KV or higher
180mm	4"	1806	2600KV
210mm	5"	2204-2206	2300KV-2600KV
250mm	6"	2204-2208	2000KV-2300KV
350mm	7"	2208	1600KV
450mm	8", 9", 10"	2212 or larger	1000KV or lower

Tabla 1. Kv dependiendo de tamaños de marco y Hélice.

1.3 Voltaje de alimentación

Estos motores admiten una cantidad de # de celdas que debe tener La lipo alimentarlos. Mayor número de celda da más energía, pero más celdas mayor peso para la estructura. Una Lipo de 3 celdas en serie o 3S es más útil para la aplicación teniendo como base el voltaje requerido de los dispositivos a usar(Ver tabla x). Cada celda en promedio da unos 3.7 V lo que en total daría 11.1 V. Se necesita un cargador

especial para estas baterías porque requieren de un proceso de balanceo para nivelar los

Dispositivos como el transmisor-receptor de video, el hardware de control arduino, giroscopio, funcionan con voltajes inferiores o dentro de los 12V.

1.4 Selección de Hélice o Propeller

Con un mayor tamaño de hélice se logra manejar mayor volumen de aire y por ende generar mayor sustentación, pero igualmente se debe tener un motor con un torque el cual no vea su KV demasiado afectado por la carga de hélice. Una hélice en estas aplicaciones se referencia por su largo y por el llamado pitch o paso con la denominación “largo x paso” en pulgadas , Según [14] para motores de este tamaño se usan hélices de “9 x 6 ~ 10 x 4.7 para vuelos lentos y 9X4.3 (Con auto apretado incluido)” .El auto apretado es importante ya que una hélice al desalinearse con el eje del motor, pierde velocidad y transmisión de torque del motor, y que sea propensa a generar vibraciones al sistema y que hasta que se impulse y sea desconectada, y con que todo el sistema falle porque el dron no se puede sustentar. Es por esto que para hélice se seleccionará esta referencia.

1.5 Selección de ESC-Driver de Potencia

Para el control de los motores en aplicaciones de Drones es casi ya un estándar el uso de los llamados ESC o variadores de velocidad. Estos controladores permiten la regulación de la velocidad de un motor AC como son los brushless como si fuera un motor DC, haciendo uso de PWM para la distribución de voltaje y por ende potencia al motor.

El criterio de selección de los ESC principal su tasa de corriente continua. Esto indica el máximo paso de corriente que es capaz de dar de forma segura al motor. Se supondrá a partir de referencias de motores brushless de también tamaño 2212 y KV 920 RPM/V que la corriente del motor estándar de consumo de 15-25 A. También es recomendable que se elija un ESC con corriente un 30% mayor a la corriente pico del motor [19]. corriente pico del motor ref youtube. Considerando una corriente de diseño pico del motor a 20 A ,el esc debe soportar una corriente de 26 A al menos. Comercialmente los valores están dados en múltiplos de 10 por lo que el ESC que asegura ruptura del circuito en caso de sobrecarga es de 20 A, y que sea para una Lipo de 3S.

1.6 Costo

Se acordó un costo máximo a invertir de 100.000 por cada motor. Los precios fuera de Colombia están entre los 15- 30 USD para motores de tamaño 2212 e igual para los ESC.

1.7 Empuje y Potencia

Mediante la ayuda del software Drive calculator, con los parámetros anteriormente escogidos, se realiza búsqueda de un motor análogo para obtener aproximación sobre el empuje que puede generar el motor y la potencia. En la imagen x se muestra gráfico para el modelo análogo Hyperion z2209. Este respecto al nuestro tiene en que su dif de peso es menor y el kv también, pero esto es ya considerado por lo que la hélice lo disminuirá. Se observa que podríamos tener un empuje para unos 700 kg. También un consumo que no pasaría de los 12 A, y por lo menos eficiencia mayor al 60%.

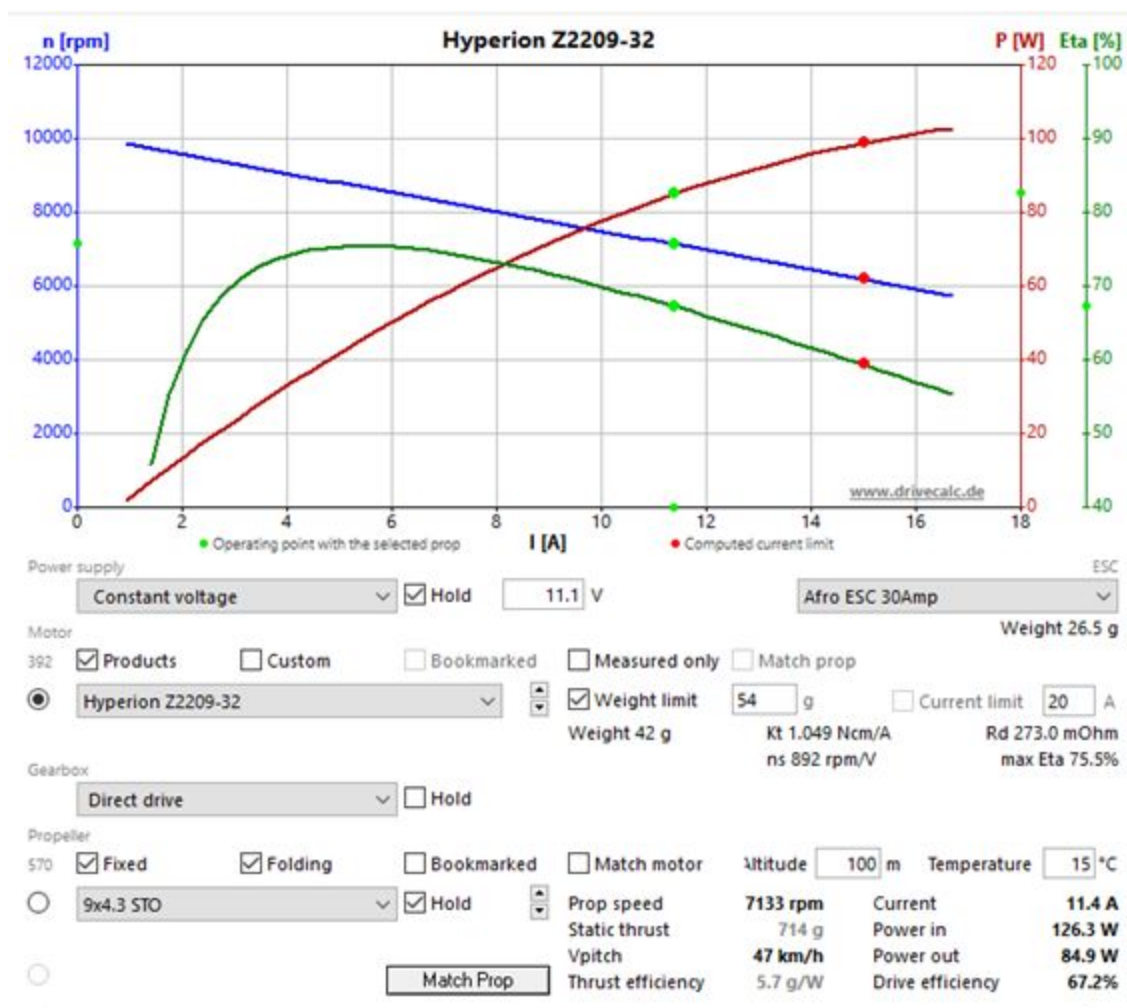


Figura X:Características Brushless Motor Hyperion zz209-32
Fuente: Drive Calculator.



Figura X:Características Brushless Motor Hyperion zz13-20
Fuente: Drive Calculator.

Con otro modelo análogo “Hyperion Z2213-20” en condiciones similares, se obtiene a partir de un Kv más alto del planteado, pero con peso similar, puede inferirse que el empuje con el comportamiento del modelo anterior estaría por el orden de los 800-900 g, su eficiencia también es similar (una dif del 3%), y el consumo de corriente por debajo de los 20 A, que trabaja en una zona segura.

La selección finalmente fue buscar cuatro motores con peso entre 40-55 g, uso de hélices de 9x4.3 con autoapretado, para voltaje de lipo de 3S , y una corriente límite de unos 20 A, tamaño de estator de referencia 2212 y Kv unos 920.

Con otro modelo análogo “Hyperion Z2213-20” en condiciones similares, se obtiene a partir de un Kv más alto del planteado, pero con peso similar, puede inferirse que el empuje con el comportamiento del modelo anterior estaría por el orden de los 800-900 g, su eficiencia también es similar (una dif del 3%) , y el consumo de corriente por debajo de los 20 A, que trabaja en una zona segura.

La selección finalmente fue buscar cuatro motores con peso entre 40-55 g, uso de hélices de 9x4.3 con auto apretado, para voltaje de LiPo de 3S , y una corriente límite de unos 20 A, tamaño de estator de referencia 2212 y Kv unos 920.

La búsqueda por red dio con el conjunto [3] “Combo Motores 2212 y Helices 9.4x4.3 CW/CCW” de precio 125.000 con hélices de repuesto y dos motores, así como tornillos para sujeción, para un total de 250.000. Su correspondiente ESC debe ser de 20 A, pero el precio excede un presupuesto estimado , y sabiendo que en condiciones máximas de voltaje los motores no pedirán más de sus 20 A se obtuve 4 para cada motor de 30 A de un 30% más económico.

2. Selección Sistema de video:

El sistema de video está restringido por varias variables, que incluyen: Peso del dispositivo, rango de transmisión, volumen de ocupación, amplitud de la señal de la transmisión, frecuencia de transmisión, entre otras. Inicialmente, debe tenerse en cuenta que la transmisión de video involucra variables demasiado complejas para ser interpretadas por el procesador central de todo el proyecto, la tarjeta ARDUINO MEGA 2560. En el mercado se pueden encontrar sistemas de cámaras con características que aseguran un gran desempeño (alcance a grandes distancias o con una gran resolución en la transmisión) pero si bien no cumplen los dos propósitos, pueden ser demasiado caras, teniendo en cuenta que en el mismo mercado se han encontrado otras alternativas que proporcionan el mismo propósito, satisfaciendo la misma necesidad, tal vez sin demasiado detalle, pero con suficiente rendimiento.

Es muy conveniente analizar algunas de las alternativas consideradas por medio de los atributos proporcionados por el vendedor, y posteriormente dar razones de peso para la selección particular de un sistema. Una de las características más importantes dentro de la selección es la que se relaciona con la alimentación, dado que la fuente se ha

escogido para los motores y otros sistemas, la cámara debería acoplarse con estas necesidades sin ningún tipo de modificación.

Algunos de los catálogos consultados para la selección de cámaras están disponibles en tiendas online de aeromodelismo y vehículos de control remoto, ubicadas en su mayoría en Bogotá. Algunas de ellas son Mundo RC y Manolo's Hobbies. En los catálogos se encuentra información relevante a la composición del sistema: el peso de los elementos a bordo y tamaño, principalmente. También se encuentran datos acerca de la tensión de entrada de alimentación para los dispositivos, además de las frecuencias de los canales que establecen la comunicación. Comenzamos las alternativas por este excelente dispositivo, una breve ficha técnica con parámetros relacionados al desempeño del sistema de video y los componentes:

Primero tenemos esta cámara *sin marca*, de la página *mercadolibre*, en donde podemos ver atributos tales como:

Atributo	Valor
Tamaño [mm]	59.27 x 41.13 x 29.28
Tiempo de autonomía [min]	70
Alimentación	Batería independiente 5[V] – 1[A]
Pantalla:	Si, al reverso de la cámara.
Precio	188.000.00 COP

Tabla:: Cámara FPV para deportes.

Fuente: Autores.



Figura. Cámara FPV para deportes *sin marca* con batería independiente.

En este instante ya se hace evidente que el artículo mencionado no cumple con las especificaciones requeridas, todo lo que trae es una cámara, y posteriormente habría que añadir una etapa de transmisión por radiofrecuencia, algo que no se dispone hasta el momento.

Buscando información más específica en tiendas especializadas en navegación con vehículos no tripulados, se encuentran dos productos sobresalientemente mejores que el anterior, estos ya incluyen un módulo de comunicación sobre el cual se establece la interacción entre un puesto en tierra de la perspectiva sobre el aire:

Atributo	Valor
Marca	Sony
Tamaño [mm]	41 x 28 x 16
Peso [g]	29.9
Alimentación	8 ~ 12 [V] 1000 [mW]
Lente [MM]	3.6
Autonomía [min]	60
Frecuencia [GHz]	2.4
Precio [COP]	483.000.00

Tabla: Cámara con transmisor sin marca (Genérica) con lente Sony.



Figura. Cámara *sin marca* con lente Sony y módulo de comunicación de video por RF.

En este caso, se trata de un dispositivo encontrado en la página de *Mundo RC*, es una cámara que incluye el transmisor y receptor de la señal por RF.

La cámara que ha sido presentada anteriormente ya cumple con especificaciones de transmisión, utiliza una banda dedicada para presentar el contenido percibido por la cámara y permite la disposición por medio del receptor de RF. Este dispositivo se aproxima bastante a lo que se ha buscado para el UAV, y sin embargo, hay otro con mejores prestaciones que este, permitiendo no sólo un menor peso, sino además un menor consumo de energía, algo de vital importancia para la construcción del dron.

El dispositivo presentado a la izquierda fue hallado como el anterior en la página de *Mundo RC*, y no sólo contiene el transmisor y el receptor, sino algunas otras herramientas que permiten realizar la navegación por aire de forma más eficiente, como unos goggles con una pantalla que se ubican en la cabeza de la persona que dirija el dron.

Las especificaciones se muestran a continuación:

Atributo	Valor
Marca	Quantum
Alimentación	8~12[V] 100 [mW]
Tamaño [mm]	27 x 32 x 5
Peso [g]	18
Autonomía [min]	60
Frecuencia [GHz]	2.4
Precio [COP]	333.000.00

Tabla: Sistema de FPV para dron de la marca *QUANUM*

Fuente: Autores.

Como puede darse cuenta, el sistema que estamos analizando tiene unas prestaciones muy similares al segundo, pero además incluye otras prestaciones que lo hacen más

interesante, como la inclusión de los googles, y el consumo significativamente menor (10 veces), la discreción del montaje y el precio son otras características por las cuales se decidió adquirir.

En conclusión, sobre la selección del sistema de video, no se obtuvo un dispositivo con las mejores prestaciones en cuanto a imagen, pero si se tiene una herramienta íntegra que proporcionará una perspectiva que cumple con las especificaciones funcionales y se acopla al sistema sin representar la mayor dificultad, especialmente en cuanto a la especificación inicial dada por el proyecto, relacionada con la batería.



Figura. Cámara seleccionada marca *QUANUM*. Trae módulo de transmisión por RF, pantalla para una experiencia de FPV real y selector de canales para múltiples transmisiones.

3. Selección Hardware de control - Sistema de desarrollo (Arduino):

La selección de hardware de control es un tema muy complejo que no tiene un método claro, sabemos que para trabajar con los módulos escogidos debemos tener las siguientes características:

Elemento del dron	Requerimiento en Hardware
Sensor CO	Entrada analógica
Transmisor RF	Comunicación SPI
Receptor RF 433MHZ	Comunicación Serial
Motores X 4+ESC X 4	Salida digital (+librerías para control)

GPS	Comunicación serial
Giroscopio	Comunicación Serial
Altimetro	Comunicación I2C

ARDUINO 2560 es una plataforma libre de computación de bajo coste basada en una placa de entrada-salida y en un entorno de desarrollo *IDE (Integrated Development Environment)* que implementa el lenguaje Processing/Wiring Hardware. Consta de una placa y un microcontrolador. El microcontrolador consta de:

1. Aref- Pin de referencia analógica
2. GND- Señal de tierra digital
3. Pines digitales 2-13. Entrada y salida
4. Pines digitales 0-1 / entrada y salida del puerto serie: TX/RX
5. Botón de reset- Pulsador
6. Modulo de comunicacion SPI.
7. Modulo de comunicacion I2C
8. Pines de entrada analógica 0-5
9. Pines de alimentación y tierra
10. Entrada de la fuente de alimentación externa (9-12V DC) X1
11. Puerto USB

4. Selección Giroscopio:

Se ha usado como guía de diseño la documentación de [20], ya que de este derivará el mecanismo la correcta retroalimentación del algoritmo de control de estabilización del dron. Este elemento mide velocidad angular y puede integrarse sus valores para obtener conocimiento de la posición angular del dron. Es necesario que en cuanto a implementación, sea lo más pequeño posible, ya que este tiene que ubicarse en el centro geométrico del dron, para que la medida sea lo más exacta posible, más grande entrará en problema con el espacio que ocupan otros componentes.

El sensor L3GD20 tiene una presentación pequeña y económica, donde su comunicación es I2C, compatible con la tarjeta ARDUINO y una escala ajustable de 250/500/2000 dps (grados per second), y frecuencia de muestreo también ajustable de frecuencia seleccionable 95/190/380/760Hz.

5. Selección GPS

Para la selección de GPS debe tenerse en cuenta principalmente la aplicación, dado que el mercado ofrece una amplia gama de opciones para las aplicaciones. El uso más normal es para vehículos (como en este caso). Sin embargo, el caso del proyecto es más especial, porque se trata de reducir al mínimo el valor del espacio ocupado, y del peso que adiciona al resto del chasis del dron.

Adicionalmente, otra característica a considerar está relacionada con la capacidad de carga del GPS, si por ejemplo, se tiene que utilizar una fuente de alimentación recargable, periódicamente se va a solicitar entre servicios que la batería sea recargada e incluso intercambiada para asegurar el comportamiento habitual del dispositivo. Dado que se desea incluir en el UAV, la forma más homogénea sería utilizando la batería que alimenta todos los componentes. Y esto también entra a formar otro requerimiento: el mínimo consumo.

Otro de los atributos importantes dentro de la selección del GPS es la conectividad. Dado que el sistema del dispositivo completo se ha previsto utilizando módulos de comunicación por RF de considerable alcance, la señal que se ha obtenido del GPS se podría comunicar por el mismo canal. Este último requerimiento con el propósito de mantener al mínimo la complejidad de las señales recibidas por la interfaz en tierra.

Finalmente, se debe tener en cuenta que, dada la interpretación de la señal del GPS, los datos obtenidos pasan primero por la unidad de procesamiento del proyecto (Tarjeta ARDUINO MEGA 2560) para su disposición en tierra. Esto marca uno de los atributos más importantes del dispositivo a elegir, su compatibilidad con el Arduino.

El dispositivo seleccionado para su implementación en el proyecto es el modulo GPS GY-GPS6MV2 para Arduino, con las siguientes propiedades:

Atributo	Valor
Alimentación [V]	3 ~ 5
Nivel de comunicación [V]	3
Interfaz	UART Asíncrona

Precio [COP]	50.000.00
Tamaño [mm]	23 x 30

Tabla: Módulo GY - GPS6MV2.

Fuente: Autores.



Figura. Módulo GPS para Arduino.

Sobre la implementación del sistema de GPS hay una amplia bibliografía, algo que no solo sirve en el equipo de trabajo, sino que además permite que posteriormente se pueda realizar investigación haciendo uso del vehículo por medio de la modificación de parámetros que se disponen en el código fuente del proyecto.

El módulo ha sido seleccionado dadas sus prestaciones relacionadas con consumo, tamaño, y sobre todo compatibilidad. Aunque se estudió el uso de otras alternativas, como sistemas independientes para la comunicación de la posición, se consideró inadecuado dado el diseño de otros dispositivos, que no permitían ser incorporados con facilidad al dron, además del aumento en la complejidad para tratamiento de señales.

6. Selección Sistemas RF

Dentro de las soluciones en comunicación, hay que tener en cuenta la alimentación, el tamaño de los dispositivos, su peso y otros factores, pero el más importante de ellos es el *alcance*, dado que se trata de un vehículo aéreo, y que no se planea realizar vuelos desde una posición muy remota, el sistema de comunicaciones bien podría acotarse dentro de los *1000 metros*.

Teniendo como premisa el alcance por encima de todo, también debe tenerse en cuenta el protocolo de comunicación de los elementos, y eso se rige por los módulos en sí mismos. Cuando se transmite cualquier grupo de datos, se requiere establecer

inicialmente las reglas bajo las cuales los receptores van a identificar ese contenido, cómo se va a leer, y en el caso de los emisores, cómo se agrupa para enviarse. Para el caso del proyecto, habiendo seleccionado el procesador, resulta muy conveniente incluir la comunicación por medio de un dispositivo compatible. Luego, la selección también se orienta a la compatibilidad con el dispositivo de procesamiento.

Contando con las recomendaciones anteriores (bajo peso, gran alcance, conectividad opcional) se analizan las alternativas relacionadas, y se encuentran dos que podrían establecerse como soluciones:

La primera de ellas es un equipo de mediano alcance, bajo peso y reducidas dimensiones, se trata de un Aurel XTR-7020-A8, es un dispositivo con un alcance de al menos 300 [m] un consumo energético de ~ 900 [mW] y un costo de 108.500.00 COP. Es un dispositivo discreto y sencillo, no requiere de antena, pero para la coordinación de transmisión, requiere como mínimo un shield para conectar con el Arduino.



Figura. Módulo nRF24L01 para comunicación por RF.

El segundo, es un módulo nRF24L01 con antena. El módulo tiene un consumo energético de 200 [mW] un tamaño de 39 x 21 x 17 [mm], el peso del módulo es realmente reducido, con tan solo 89 [g] incluyendo la antena. Sin lugar a duda, el mayor atractivo de este dispositivo es su gran alcance, ya que, con la antena, en espacios abiertos, puede alcanzar hasta 1000 [m]. El módulo es discreto, funcional y muy económico, pues cuesta tan solo 15.000.00 COP.

La comparación entre los dos módulos es evidentemente favorecedora para el módulo nRF24L01, debido a que su alcance es mayor. Además, este último no requiere un módulo para acoplarse al procesador principal (ARDUINO MEGA 2650) sino que se puede conectar directamente, lo que supone un ahorro tanto en espacio y peso, como en dinero.

6.2 Sistema comunicación-manilla

El radio mínimo de detección establecido se supondrá 20 m, para que el dron detecte alguna señal que esté siendo transmitida por el usuario de su localizador para el dron, cómo sería su ubicación GPS.

Por costos y el manejo ya de frecuencias variadas se selecciona como módulo de reconocimiento inalámbrico el par emisor receptor RF de 433 MHz, que según información del proveedor con una alimentación de 12V al transmisor, el alcance puede llegar a 200m [4], pero se hace imperativo el uso de antenas del tipo enrollada para aumentar efectivamente el alcance.

7. Selección Barómetro(Altímetro):

Como el dron está a presión atmosférica, es decir al aire libre y no en un medio confinado, se requiere claramente de un barómetro, y no un manómetro por ejemplo. El dron volará a unos 100 m de altura en promedio en Bogotá que a 2640 m sobre el nivel del mar tiene la presión de 560 mmHg. El sensor seleccionado fue el BMP180, tiene una escala de entre los 0.3 a 1.08 atm, es decir de unos 250 mmHg a 825 mmHg, rango en que se encuentra la presión atmosférica en Bogotá y que por ello con una precisión de 0.0022 mmHg, se obtendrá una medición de mucha resolución.

Además, tiene de añadido contar también con la posibilidad de medición de altura y temperatura haciendo uso de modelos aproximados [6].

8. Selección sensor CO:

A pesar de que ningún integrante del equipo de diseño tiene un trasfondo extenso en detección, procesamiento o incluso en interpretación de variables químicas, la selección del sensor de Monóxido de Carbono (CO) fue relativamente sencilla dado el estrechísimo mercado de elementos de esta clase disponibles a nivel nacional. Y, puesto que no es posible seleccionar componentes cuya adquisición sea imposible de ejecutar, era nuestra responsabilidad escoger de entre las opciones que tuviéramos a la mano.

En total, haciendo benchmarking sobre todos los proveedores de componentes electrónicos especializados en dispositivos de cierto nivel pensados para aplicaciones en robótica y control, identificamos dos únicos candidatos viables a sensor en nuestro proyecto:

8.1 Sensor MQ-7:

Sensor con capacidad de detección de concentraciones de CO entre 20 y 2000 ppm (Partes por Millón). Posee buena sensibilidad y un tiempo de respuesta aceptable, su salida es una resistencia análoga y su interfaz de operación es simple, bastando solo con alimentar una tensión de 5V en AC o DC, aplicarle resistencia de carga y conectar su salida al conversor análogo-digital. Opera entre -10 a 50°C y consume menos de 750 mW en potencia.



Figura X: Sensor MQ-7
Fuente: TDRobotica.

8.2 Sensor MQ-9:

Este sensor es una versión mejorada del sensor que se tomó como base para su diseño, el ya nombrado MQ-9, está pensado para hacer detección tanto de CO (en un rango de 10 a 10000 ppm) como de gas combustible (gas natural, con un rango de 100 a 10000 ppm). Tiene buena sensibilidad y un tiempo de respuesta mejor que el de su antecesor, su salida es una resistencia análoga y su interfaz de operación es simple, bastando con alimentarlo con una tensión de 5V en AC o DC, aplicarle resistencia de carga y conectar su salida al conversor análogo-digital. Opera entre -10 a 50°C y consume menos de 750 mW en potencia.



Figura X: Sensor MQ-9.Fuente: Mactronica.

Sabiendo ya que las especificaciones técnicas de ambos sensores son más que similares, decidimos decantarnos por el MQ-9, puesto que aunque es bien sabido que los instrumentos con mayor rango de detección tienen menos precisión que los que tienen un rango más estrecho (eso hace de estos últimos mejores medidores que los primeros, pues su medición es más confiable), es precisamente su rango de detección lo que los hace tan útiles en labores de alerta. Aunque no nos arrojen una medición tan acertada, si nos dan una tendencia más clara del comportamiento del medio en el que se encuentran, por lo que podemos discriminar más fácil y rápidamente entre niveles de alerta para la salud de las personas a las que el prototipo UAV pretende garantizar seguridad sin necesidad de cambiar de elemento de trabajo.

9. Selección sistema de interfase humano-máquina:

Para la interfase humano máquina pensamos usar por accesibilidad un sistema de la siguiente manera:



Donde usamos el computador de intermediario para poder analizar los datos y además poder usar el control del xbox ya que la finalidad del sistema es eliminar el conductor de el dron (esto no está en el alcance de este proyecto).

Para el uso del control nos basaremos en el método más común que es el siguiente:

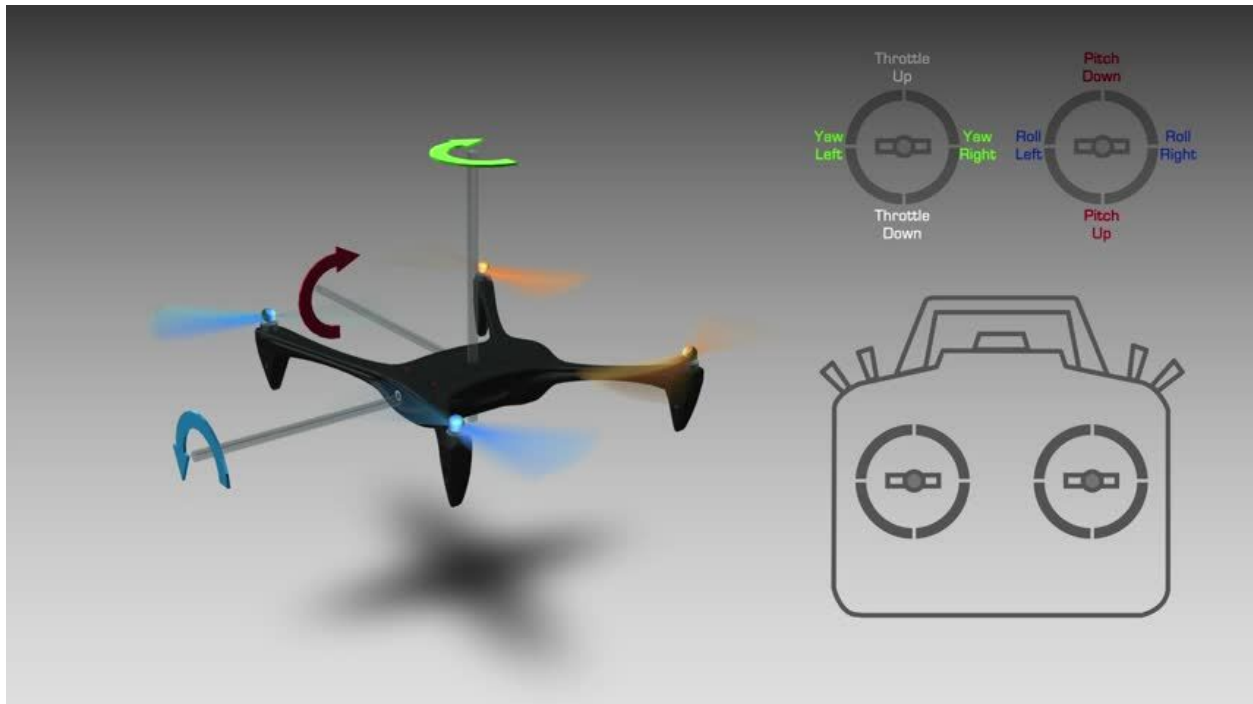


Figura X:Dron y acciones del control

Fuente: Imágenes de Google.

Donde una de las palancas de mando está encargada de controlar la potencia de los motores junto a el giro de yaw (verde), mientras la otra está direccionada a controlar el giro de pitch (rojo) y roll (azul), y esto completaría las posibles variables en el dron.

En base a el control de XBOX solo usaremos las palancas de mando por ahora y dejaremos abierto el uso de el resto de los motores de ser necesarios en la etapa de control.

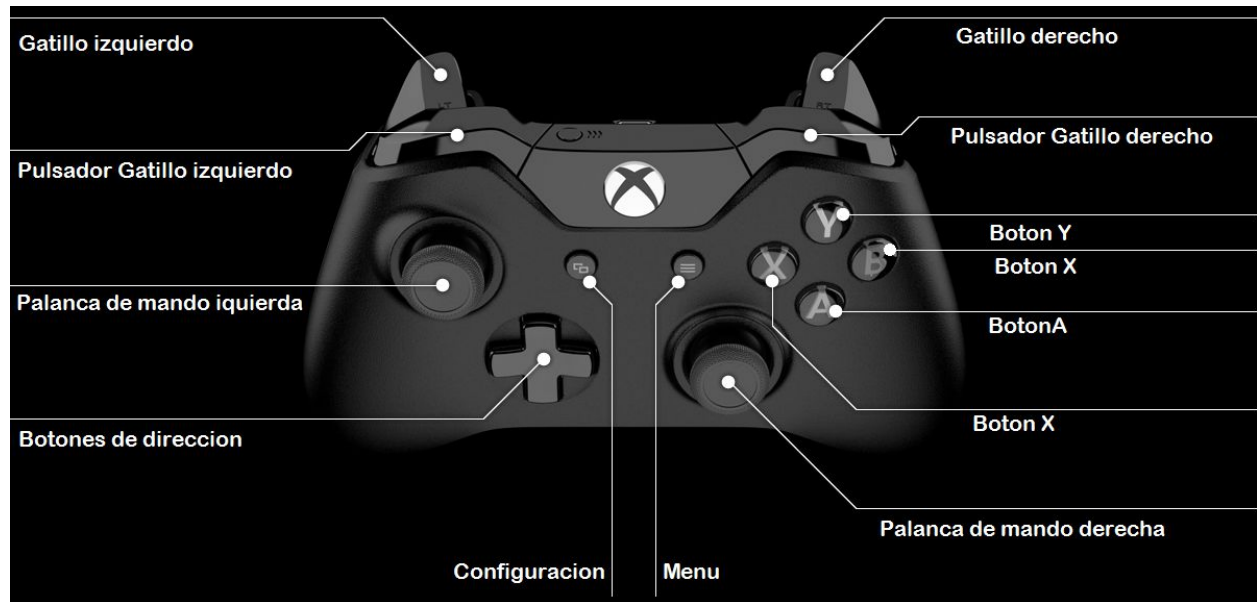


Figura X:Protocolo de comando control xbox.

Fuente: Microsoft..

- La palanca de mando izquierda está encargada de controlar la potencia de los motores junto a el giro de yaw (verde).
- La palanca de mando Derecha está encargada de controlar el giro de pitch (rojo) y roll (azul).

10. Selección de la batería LiPo:

Para la selección de la lipo se tuvieron en cuenta las corrientes de operación de cada uno de los elementos que usa el dron:

Elemento del dron	corriente de operación	voltaje de operación	potencia de operación
Arduino 2560	100mA	12V	1.2W
sensor CO	70mA	5V	0.35W
transmisor RF	70mA	3.3V	0.231W
Receptor RF 433MHZ	4mA	5V	0.02 W
motores X 4+ESC X 4	8A	12V	96W
indicador de carga	10mA	12V	0.12W

sistema de cámara	70mA	12V	0.84W
GPS	100mA	5V	0.5W
regulador 3.3V	100mA	12V	1.2W
regulador 5V	100mA	12V	1.2W
giroscopio	1mA	3.3V	0.0033W
altímetro	120 uA	3.3V	0.000396W
total	8.37A	12V	101.664W

Tabla n
Fuente: Autores

Con base en esto y sabiendo que la batería tiene que dar un tiempo de vida de la carga de 45 minutos aproximadamente escogimos una batería de 3S que da una tensión de salida nominal de 11.1V que es el que se recomienda para voltajes cercanos a 12V y de 5.2Ah sabemos por el cálculo de las corrientes de todos los sistemas que se requieren aproximadamente de 6.2Ah pero en el mercado no se consigue una batería de este tamaño fácilmente y como no es camisa de fuerza la duración de la batería dejamos la escogida anteriormente, la cual nos da una duración de 38 minutos que es aceptable, y nos da un rango de vuelo suficiente para la aplicación, además al considerar la corriente de los motores, como es variable puede que cambie debido a que depende de factores que no se pueden medir sin tener el prototipo funcionando.

11. Selección reguladores.

En cuanto a voltajes a manejar se tiene en todo la electrónica 3 valores: 3.3 ,5 y 12 voltios. El voltaje de 12 voltios se obtiene a partir de la propia batería Lipo energizando elementos por ejemplo como los motores y el sistema de video.Sin embargo los otros no puede solo usar las salidas del microcontrolador ATMEGA2560, ya que este da hasta 40 mA de alimentación por pin [33]

Se hace imperativo pensar en un regulador que disminuya el voltaje de 12V nominal de nuestra batería a las lógicas y potencia de los otros dispositivos, y no buscarse otras baterías ,que en general son de las que más influyen en el peso de los UAVS.

Muchos reguladores no poseen como entrada los 12V sino valores menores, además que tienen tamaños relativamente grandes en comparación a otros empaques en forma

modular. Finalmente, se tuvo conocimiento por distribuidores [9] del regulador de Paso bajo MP1584. Se puede alimentar hasta unos 28 V, muy por encima de los 12 V como limite energetico y puede suministrar hasta 3A, lo cual usando 2 se tiene suministro de corriente asegurado para todos los dispositivos diferente al sistema de potencia.

12. Selección cables.

Se escogieron dos tipos de cable, uno para la parte de potencia teniendo en cuenta la corriente máxima que debería soportar que seria de 12A, por tanto gracias a las tablas escogemos un cable AWG 16, luego para la parte de control en donde las corrientes se encuentran por debajo de los 200 mA escogemos un cable AWG 27.

2.2 SELECCIÓN DE MATERIALES Y TÉCNICAS DE PRODUCCIÓN PARA COMPONENTES PERSONALIZADOS

1. Estructura

Es el cuerpo propio del UAV. Este tiene las funciones de:

- Soportar las cargas más significativas del sistema como lo es la batería y los motores.
- Servir de puente para el cableado de componentes.
- Contener toda la electrónica de potencia y de control.

Materiales y Técnicas de Producción

Los materiales para esta aplicación, considerando que se hará uso del proceso de prototipado 3D debido a su facilidad de manufacturar, poco tiempo de producción e versatilidad en cuanto ensamblabilidad son entre ABS o Policarbonato.

2. Placa de expansión para conexión modular

El número de sistemas a conectar también está asociado directamente a la cantidad de cables que tendrá que disponerse, en un diseño modular que no se tenga certeza o orden en cuanto a su correspondencia puede terminar en daños a la electrónica por el factor humano. Por ello las funciones de este componente, al que en inglés se le da el nombre de SHIELD son:

- Ofrecer una manera cómoda y organizada de conectar todos los sistemas
- Permitir la conexión directa con el arduino y los pines a utilizar.

- Ser ligero de forma que esté posicionado encima de los pines del arduino.
- Tener grabados de qué corresponde cada conector en la placa.
- Servir de puente dimensional para la ubicación de diferentes componentes a lo largo del sistema.
- Ofrecer la función de alimentación a toda la circuitería y de medición del nivel de la batería

Materiales:

Los materiales usados para esta aplicación son fibra de vidrio , poliamida ,poliestireno o polímeros como la baquelita.

Técnicas de producción

Las técnicas principales de producción son:

- Atacado
- Perforado
- Estañado y máscara antisoldante
- Serigrafía

2.3 DEFINICIÓN DE LAS RESTRICCIONES ESPACIALES

El dron tendrá un tamaño de marco de aproximadamente 500 mm, sus brazos deben estar inclinados entre 0-5° de tal forma que los ejes de los motores coincidan con un punto en el infinito. Este punto infinito determina un cono de estabilidad de forma que las acciones laterales individuales de las hélices se compensen globalmente. Esto se hace teniendo en cuenta que el ángulo de inclinación de un dron con capacidad de grabar video o imágenes no puede superar los 15°, puesto que en estas aplicaciones prima la fluidez y la estabilidad del A/V frente a la gran velocidad (que es el fuerte de UAVs velocistas o acrobáticos).

2.4 IDENTIFICACIÓN DE PIEZAS INDEPENDIENTES

Como la metodología que estamos siguiendo es la de diseño modular, cada componente se considera separadamente como un módulo. Esto es, a excepción de la propia estructura (dividida en cada una de sus partes individuales que después requerirán ensamble por unión atornillada o adhesión permanente) y el sistema de potencia que se subdivide en las secciones de motor más hélices .

2.5 DESARROLLO Y CONEXIÓN DE LAS INTERFACES FUNCIONALES

Todas las interfaces se conectan a través del sistema de desarrollo ARDUINO MEGA 2560 R3.

3. FORMULACIÓN Y SÍNTESIS DE MODELOS

Para esta parte se definieron los modelos CAD de cada una de las piezas personalizadas de la estructura. Las únicas piezas que habrían normalizadas en el ensamblaje final serían tornillos, que no vale la pena mostrar en estas muestras que bien podrían estar sujetas a cambios entre este punto y el momento de prototipado final.

3.1 MODELOS GRÁFICOS Y SÓLIDOS (CAD)

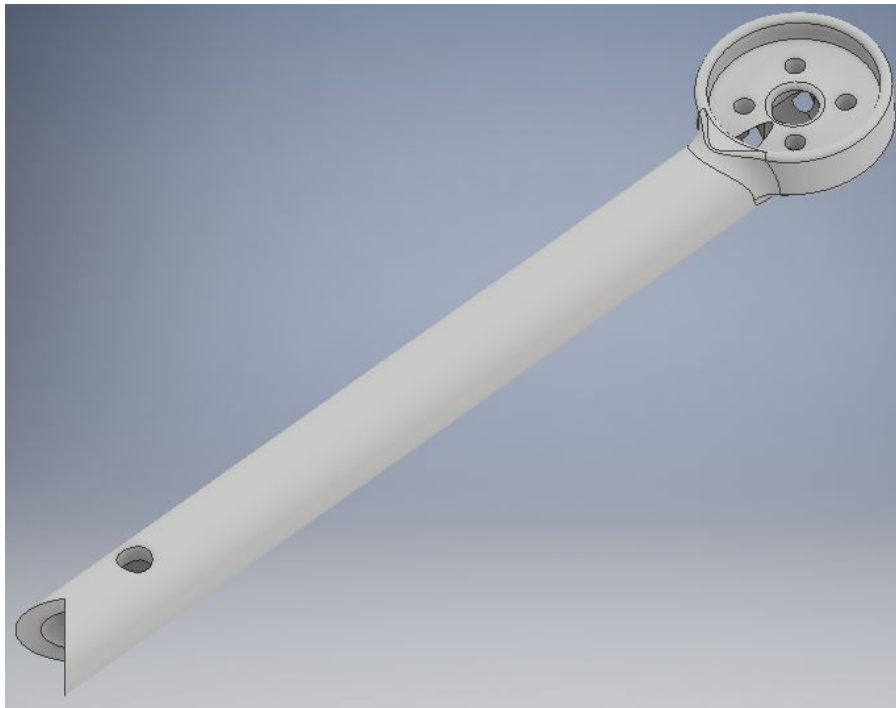


Figura: Brazos.

Fuente: Autores.

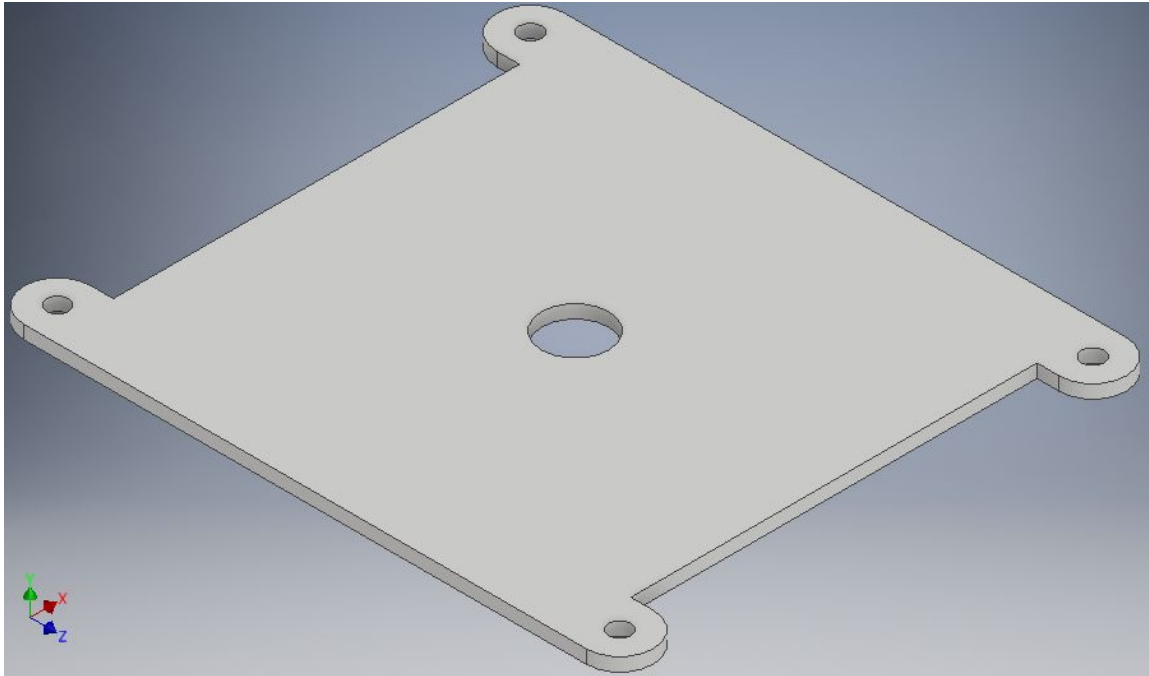


Figura: Tapa.
Fuente: Autores.

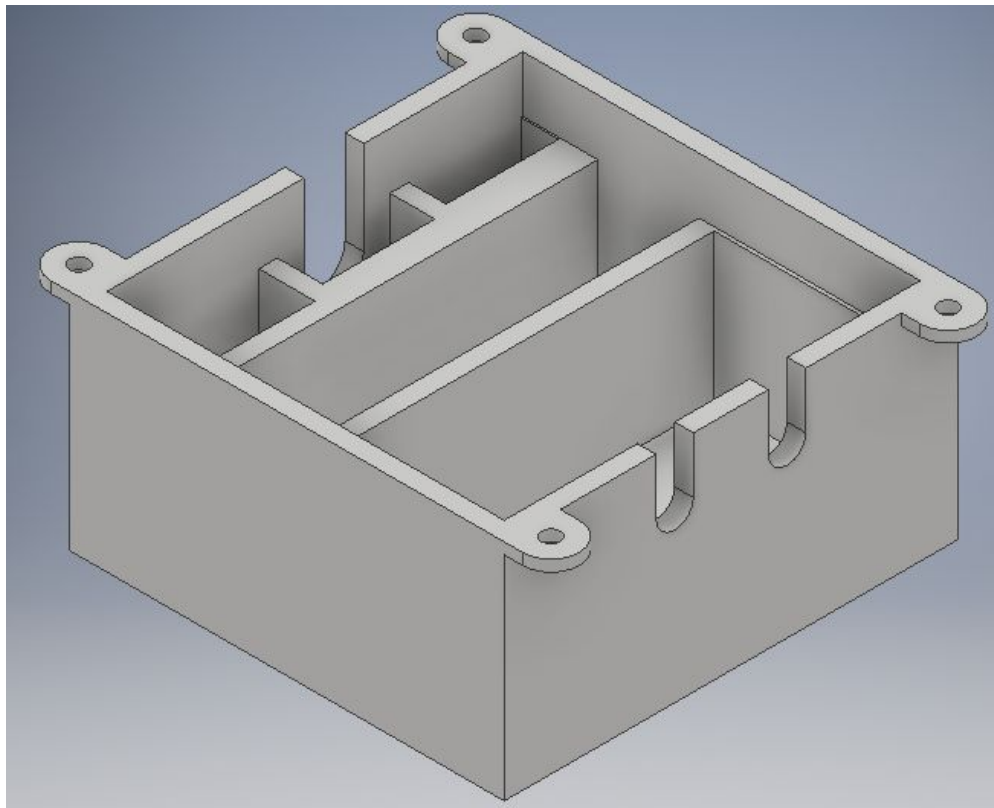


Figura: Bloque.
Fuente: Autores.

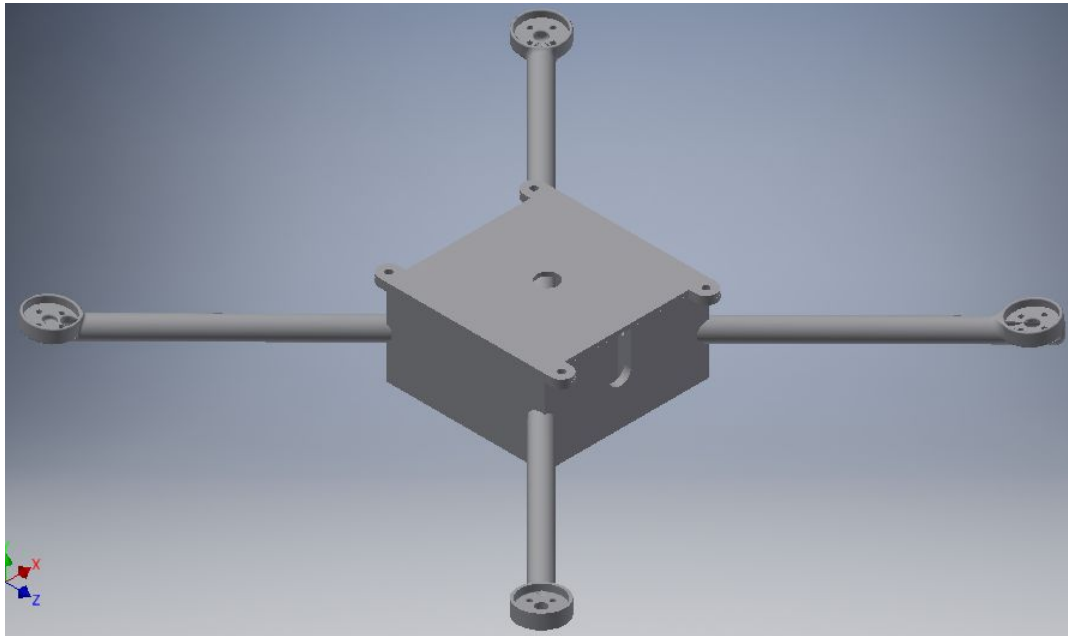


Figura: Estructura - Conjunto.
Fuente: Autores.

3.2 MODELOS MATEMÁTICOS Y NUMÉRICOS

1. Sensor CO

$$R_s \backslash R_L = (V_c - V_{RL}) / V_{RL}$$

donde R_s es la resistencia propia del sensor

R_L es una resistencia de carga que ajusta la sensibilidad

V_{RL} es el voltaje sometido a R_L

V_c el voltaje de salida del sensor ante CO.

2. Barómetro

$$\text{altitude} = 44330 * \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right)$$

donde P_0 es la presión a nivel del mar.

3. Reguladores

$$V_{OUT} = V_{FB} \frac{(R1 + R2)}{R2}$$

donde Vfb es un voltaje de retroalimentación dentro de la circuitería.

4. Diseño aerodinámico de las carcasas

$$F_v = C_v \cdot \rho \cdot A_{\text{proy}} \cdot U^2 / 2$$

$$F_h = C_h \cdot \rho \cdot A_{\text{proy}} \cdot U^2 / 2$$

Donde Fv es la fuerza de sustentación, Fh es la fuerza de arrastre, Cv es el coeficiente de sustentación, Ch es el coeficiente de arrastre, ρ es la densidad del fluido de inmersión (aire), A_{proy} es el área proyectada respecto al plano normal a la dirección del flujo y U es la velocidad del flujo de ataque.

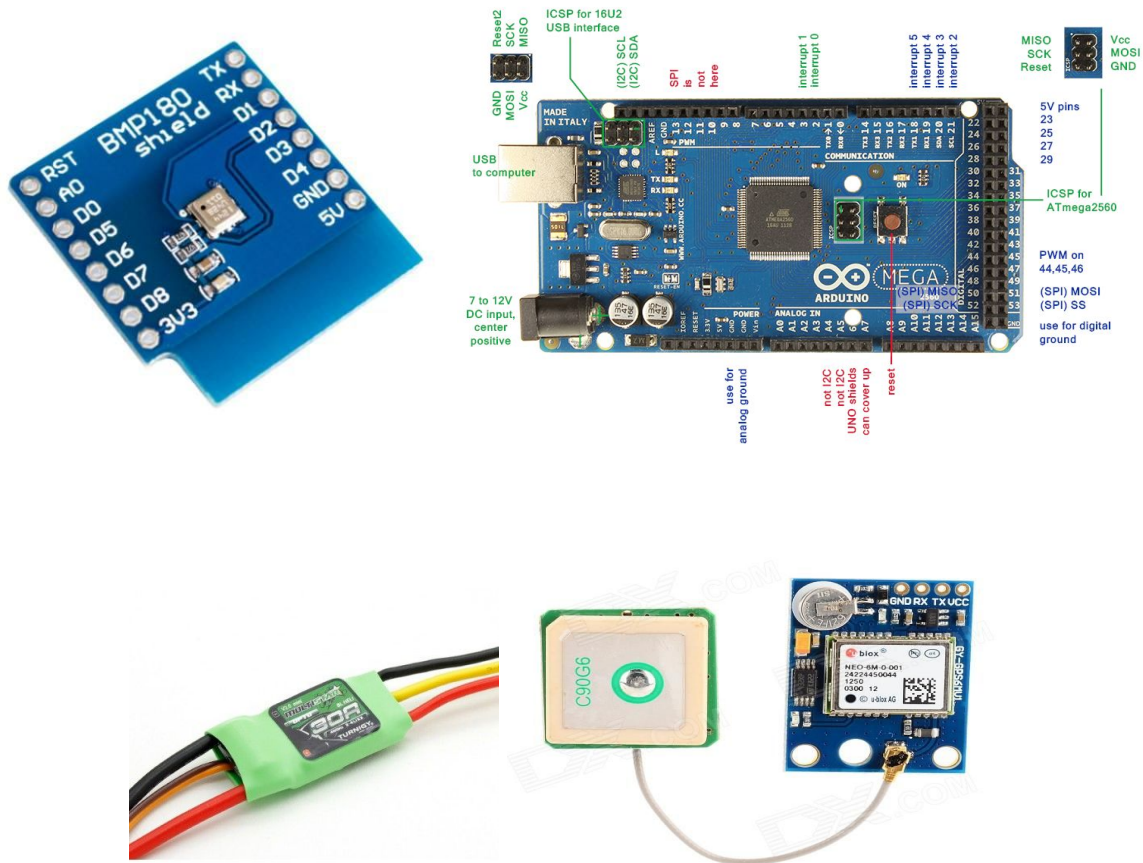
Los coeficientes se determinan a partir de la geometría y la configuración espacial de las piezas dentro del sistema de flujo generado por las condiciones de vuelo. Para la determinación del diseño nos asistimos de las herramientas AUTODESK CFD (simulador de mecánica computacional de fluidos) y AUTODESK FLOW DESIGN (simulador de tunel de viento) de la que habremos de poner un ejemplo gráfico:

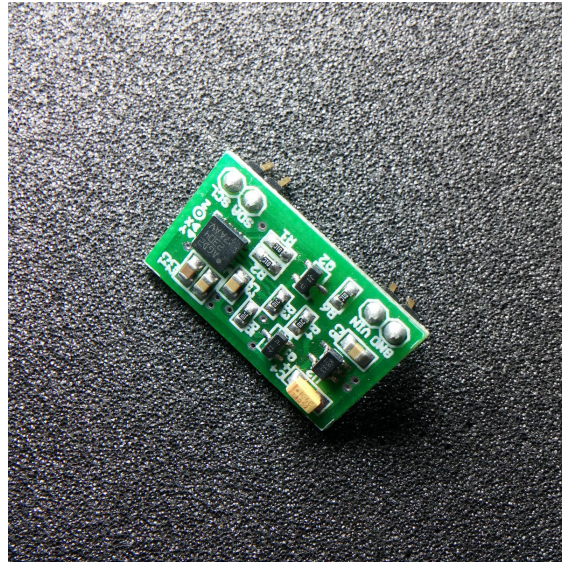
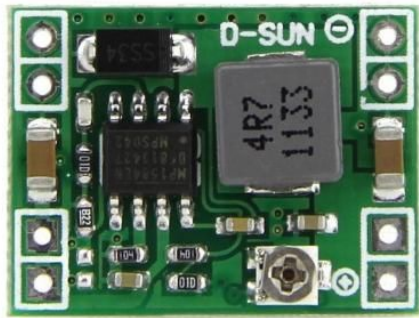


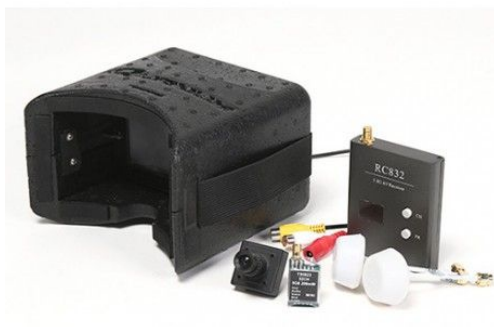
Figura: Ejemplo de simulación de AUTODESK FLOW DESIGN en estado transitorio para un automotor.

3.3 MODELOS FÍSICOS E INSTALACIONES EXPERIMENTALES

Entre los modelos físicos implementados se encuentran todo el conjunto de módulos seleccionados, las pruebas realizadas sobre su funcionamiento, y el prototipo inicial de estructura realizada con el fin de testear la operación de los motores. Mostramos a continuación una muestra de los componentes electrónicos:







4. PROCESO DE EVALUACIÓN DEL DISEÑO DETALLADO

4.1 EVALUACIÓN FRENTE A FUNCIONES Y DESEMPEÑO

Aerodinamica

a nivel estructural fue necesario hacer un diseño aerodinámico para optimizar el movimiento y evitar que los motores actúen innecesariamente, por esto se tomaron en cuenta las geometrías de que nos dieran lo que necesitábamos.

Funciones

Para el funcionamiento básico a nivel de elementos montados sobre el dron, se requiere que hayan los siguientes componentes:

- Sensor GPS.
- Sensor altura.
- Sensor giroscópico.
- Sensor de monóxido de carbono.
- Transmisor de datos de vuelo.
- Sistema de cámara para vuelo en primera persona.
- Batería.
- Motores con controladores.

Los cuales se cumplen a totalidad.

4.2 EVALUACIÓN DEL PRODUCTO POR FACTORES (DfX).

Esta sección será tratada de forma dividida sobre sus componentes individuales de forma que su lectura sea más práctica y manejable:

4.2.1 EVALUACIÓN DEL DISEÑO ORIENTADO A FABRICABILIDAD.

Lo que es necesario fabricar en este proyecto es: La estructura y la estructura electrónica.

Para el caso de la parte estructural del dron se tuvo en cuenta las características de las impresoras 3D pero ya que cada una de las impresoras, brinda cierta capacidad

geométrica y de acabado que pueden llegar a ser necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, es necesario tener abierta la idea geométrica final.

4.2.2 EVALUACIÓN DEL DISEÑO ORIENTADO A ENSAMBLABILIDAD.

Debido a la baja, cantidad de partes que son necesarias ensamblar, el proyecto se puede considerar fácil de ensamblar, pero claro siempre pueden existir problemas en este punto debido a que los elementos electrónicos tienden a ser caprichosos a la hora de ensamblar, es por esto que se tuvo en cuenta y se diseñó una placa la cual nos brinda la capacidad de asignar un cierto tipo de conector a cada uno de los elementos evitando que haya cables cruzados o intercambiados.

4.2.3 EVALUACIÓN DEL DISEÑO ORIENTADO A CONFIABILIDAD.

La confiabilidad sobre el diseño fue siempre prioridad a la hora de determinar las especificaciones de formación del prototipo, puesto que si este presenta problemas de confiabilidad esto puede influir posteriormente sobre la seguridad. Es por esto que los criterios de operación y los riesgos de diseño a tomar fueron reducidos al máximo, en lo posible ciñéndose de los antecedentes que han demostrado funcionar de forma repetida. Consideramos que el diseño ha de pasar la prueba de confiabilidad, pero que solo las pruebas de operación podrán decir la última palabra.

4.2.4 EVALUACIÓN DEL DISEÑO ORIENTADO A SEGURIDAD (AMFE).

Esta componente está íntimamente relacionada con la anterior, dado que un artillugio volador, aunque su altura de vuelo no sea comparable con la de aeronaves comerciales, siempre representa un riesgo para la vida de las personas que rodean el área de operación de este. Es por este motivo que se diseñó tratando de minimizar el impacto de este en caso de fallo, reduciendo el peso, limitando la fuerza y la energía liberadas que pudieran hacer daño a un peatón de la zona en caso de que este cayera, y sobre todo limitando el tamaño total del prototipo para que las chances de impacto se reduzcan a la mínima cantidad de personas.

4.2.5 EVALUACIÓN DEL DISEÑO ORIENTADO A IMPACTO AMBIENTAL Y RECICLAJE.

Esta componente de evaluación no puede ser cumplida armoniosamente en diseños de este tipo. Teniendo en cuenta que el policarbonato no es un material fácilmente reciclable (y con más razón en nuestro país) y que los dispositivos electrónicos de alta

complejidad están diseñados para uso y desecho. Nuestro prototipo será un elemento que genere un alto impacto ambiental una vez llegue a su fase de disposición y el reciclaje de sus partes representará un costo mayor para quien decida emprender esa empresa que el beneficio reportado por el reuso de estas.

4.3 MEJORAS AL DISEÑO PRODUCTO DE LA EVALUACIÓN DEL DISEÑO

Entendemos que algunas propiedades aerodinámicas pueden ser mejoradas debido a que no se tuvieron en cuenta las distintas formas que puede tomar el dron, es decir que algunas geometrías se pueden optimizar como por ejemplo los brazos de soporte de los motores que pudiesen en dado caso proporcionar sustentación, además que la estructura puede ser más aerodinámica e igual puede proporcionar cierta sustentación, pero esto depende de un diseño más específico aerodinámicamente.

También es posible reducir el peso de la estructura un poco debido a que existen partes y grosores innecesarios.

Es posible hacer más fabricables ciertas geometrías, debido a que durante el diseño no se tuvo en cuenta las características del fabricante en el caso de la impresión 3D, por que estas dependen de cada fabricante, a la hora de escoger fabricante se harán los cambios necesarios para optimizar esta parte del proyecto.

Algunas de las consideraciones adicionales son:

1. Uso de materiales reciclables para la estructura.
2. Empleo de baterías recargables para el dispositivo.
3. Ubicación de secciones convenientemente removidas para la inserción o remoción de componentes.
4. Utilización de software abierto para la modificación de la programación.
5. Uso modular de los componentes electrónicos.
6. Empleo de dispositivos altamente asequibles y económicos.
7. Inclusión de componentes con bajo consumo energético.

Cada uno de los ítems anteriores se van a explicar brevemente para describir su importancia dentro del diseño, si bien algunos de ellos solo se orientan a un campo, hay otros que tienen dos enfoques.

1. Uso de materiales reciclables para la estructura: Dado el proceso de fabricación, el principal material para hacer las formas constructivas del chasis es *polycarbonato*, un

polímero moderadamente resistente (80 [MPa] en compresión y 75[MPa] máximo en tensión) y no muy denso (1,2 [g/cm³]). Dado también su bajo coeficiente de fricción, y revisando posibles tratamientos superficiales como *pulido*, el policarbonato puede alcanzar bajísimas fuerzas de rozamiento con el aire. Aun así, queda por revisar la reciclabilidad del material.

Aunque se considerara un material desechable pero no reciclable, recientemente muchas iniciativas en busca del reciclado de policarbonato han surgido, algunas alternativas como combinarlo con material virgen y refundirlo pueden resultar provechosas para el procesamiento de polímeros reciclados.

Posiblemente, posterior al proceso de manufactura (impresión 3D) se pueda crear un molde para la producción en masa del chasis de otros vehículos, y aun así, el policarbonato se conserva como una alternativa, que además de poseer características mecánicas suficientes, admite procesos de remanufactura tras el adecuado procedimiento.

2. Empleo de baterías recargables para el dispositivo: Debido a que el consumo energético del vehículo es considerable, esto teniendo en cuenta la naturaleza de los motores que realizan los desplazamientos; se hace necesario el uso de una gran fuente. Y teniendo en cuenta que las únicas formas de energía extendidas para mover un vehículo, actualmente, son combustibles o eléctricas, el grupo se ha inclinado por la elección de un conjunto de baterías que proporcione energía suficiente para alimentar no solo los motores del UAV, sino también alimentar los sistemas electrónicos asociados con navegación y sensórica. Para ello, se han empleado las baterías más ligeras y con mayor capacidad de carga, y claro está, que satisfagan las necesidades de consumo de todo el dispositivo. El grupo de baterías que proporciona la carga para el dispositivo, aunque evidentemente está compuesto por metales pesados y material contaminante, resiste bastante (5200 [mAh]) y proporciona al dispositivo un comportamiento estable y robusto, puesto que la carga lo alimenta con suficiencia y constancia.

El uso de otras tecnologías (por ejemplo, combustibles), sin lugar a dudas, hubiera generado una considerable diferencia, marcada principalmente por la contaminación directa hacia la atmósfera.

El diseño a partir de baterías eléctricas también está orientado a la ocupación de tamaño, versatilidad de aplicación y a la seguridad del dispositivo y del operario. Si se emplearan otras herramientas para alimentar el sistema, se podrían alcanzar

dimensiones difíciles de tolerar en cuanto se refiere a diseño de un vehículo aéreo. Por otra parte, la energía eléctrica es una de las formas más seguras de alimentar los sistemas de vuelo. Los componentes eléctricos que se disponen son muy seguros, y pueden funcionar en condiciones ambientales muy variadas. El punto principal de comparación para esta forma de alimentación son los sistemas combustibles, que pueden generar muy buenos resultados en lo que respecta a movimiento, pero revelan ciertos inconvenientes en la seguridad, en cierto tipo de medios.

3. Ubicación de secciones convenientemente sustraídas para la inserción o remoción de componentes: Debido a que los componentes se van a disponer en un cajón diseñado por el equipo, se debe tener en cuenta que tomando en cuenta la posibilidad de sustitución, los elementos pueden ser removidos del cuerpo, algo que sería muy difícil de conseguir sin los correctos puntos de acceso a los dispositivos. Por tanto, a los lados del cajón se han posicionado rendijas que permiten deslizar fácilmente alguna herramienta o incluso los dedos de una mano para sustraer del UAV los componentes que se requiera. Un ejemplo de ello puede ser la batería LiPo, si llega a sufrir un daño irreparable debido a una mala carga o el cumplimiento de su vida útil. En ese caso, ubicado junto a la batería se dispone un agujero que permite el fácil acceso a las paredes laterales.
4. Utilización de software abierto para la modificación de la programación. Dado que el dron surge como una iniciativa de los estudiantes, es necesario hablar sobre el tipo de software que se dispone para realizar la programación. Si el desarrollo viniera de una empresa privada, es completamente coherente hablar sobre una alternativa de programación paga, pero en este caso, se usará una herramienta de programación de sistemas embebidos desarrollada por la empresa Arduino, también fábrica de la tarjeta que se utiliza como procesador del sistema.

Respecto a la alternativa, es muy aceptable utilizar este tipo de programación dada la posibilidad de utilizarla en un futuro para soportar el desarrollo de otros proyectos por parte de estudiantes en otros lugares, que pueden tomar por ejemplo el desarrollo hecho a lo largo de este proyecto para sustentar sus propias ideas, modificando convenientemente los factores que se han definido para este proyecto, y que gobiernan el comportamiento de todo el sistema.

5. Uso modular de los componentes electrónicos: Dada la oportunidad de realizar interconexiones más sencillas entre los dispositivos electrónicos, cualquier sistema planteado para el dron está compuesto netamente por este tipo de herramientas. La modularidad que permite la plataforma de desarrollo Arduino es muy conveniente para

los propósitos del proyecto, ya que además de modularidad, permite simplificar considerablemente los montajes que se realizan sobre el dispositivo. Esto resulta sumamente conveniente en lo que respecta a la fabricación del dron, puesto que el ensamblaje por bloques simplifica considerablemente la tarea de un operario encargado de realizar los montajes. Tomando en cuenta también la facilidad con la que se pueden realizar montajes sobre sistemas discretos, como en este caso, donde los componentes tampoco exceden 30 partes entre todos.

6. La plataforma de desarrollo simplifica considerablemente la tarea de cualquier diseñador, dado que simplemente está haciendo uso de componentes discretos asequibles en el país. Todos los módulos que se han seleccionado pueden obtenerse aquí, en Colombia. Por lo tanto, si posteriormente, otro equipo de desarrollo quiere orientar su trabajo al mejoramiento del desempeño o a la inclusión de nuevas herramientas, puede integrarlas en el diseño realizado.
7. Otra de las grandes ventajas de los dispositivos electrónicos utilizados es su bajo consumo energético, que junto con la batería, constituyen un gran componente ambiental, ya que hacen un uso justo y necesario de la energía asociada con el consumo del dispositivo. Salvo por los motores, cada uno de los dispositivos a bordo del UAV consume menos de 200[mA].

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante esta fase del diseño, era evidente cómo cada problema relacionaba algún otro, y consecuentemente, las soluciones alcanzadas podrían afectar el rendimiento de otras. Se resalta de nuevo la importancia del trabajo cuidadoso durante esta etapa y de la comunicación acorde entre los miembros del grupo, para lograr generar un diseño detallado, seguro y que cumpla con los requerimientos exigidos. Aunque el diseño aeronáutico y la generación de topologías convenientes para el ensamblaje compacto de dispositivos electrónicos y su interconexión cableada, al dividir la propuesta de máquina en subsistemas y abordar cada problema de diseño individualmente (sin olvidar, por supuesto, su relación con todo el conjunto) se facilitó un poco la tarea de diseño detallado y se pudo llegar a la solución presentada en este informe. Finalmente, se espera que con una revisión completa y con el uso de técnicas de optimización se pueda mejorar el diseño sin comprometer su aplicación. De todas formas, por ejemplo, en el área de la estructura aerodinámica, es el proceso de fabricación quien dará la última palabra, pues aunque este (prototipado rápido - impresión 3D) es infinitamente versátil, existen siempre geometrías y configuraciones que exceden su capacidad de manufactura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]http://www.e-radiocontrol.com.ar/?Motores_Brushless
- [2]<http://www.haoyuelectronics.com/Attachment/MQ-9/MQ9.pdf>
- [3]<http://tdrobotica.co/>
- [4]<https://www.vistronica.com/comunicaciones/modulo-rf-transmisor-y-receptor-433mhz-detail.html>
- [5]<http://www.haoyuelectronics.com/Attachment/MP1584/MP1584.pdf>
- [6] <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>
- [7] http://www.sigmaelectronica.net/manuals/Tarjeta%20L3GD20_2.pdf
- [8][https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf)
- [9] <http://www.mactronica.com.co/>
- [10]http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- [11] http://www.sokolmodel.wz.cz/P-51/Turnigy_ESC.pdf
- [12]https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_impreso#M.C3.A9todos_t.C3.ADpicos_para_la_producci.C3.B3n_de_circuitos_impresos
- [13] <http://www.drivecalc.de/>
- [14]https://hobbyking.com/en_us/
- [15] <https://oscarliang.com/quadcopter-motor-propeller/>
- [16][https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2266912-DJI-E300-\(2212-920KV\)-Motor-Prop-Testing](https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2266912-DJI-E300-(2212-920KV)-Motor-Prop-Testing)
- [17]<http://www.myrsmart.com/rcx-2212-920kv-brushless-motor-for-dji-style-prop-ccw-p-8028.html>
- [18]https://www.alibaba.com/product-detail/4x-MARSPower-MX2212-920KV-Brushless-Motor_2017967584.html
- [19] <https://www.youtube.com/watch?v=irXKHZNlw58>
- [20]<https://www.youtube.com/channel/UCpJ5uKSLxP84TXQtwiRNm1g>
- [21] Victor L Streeter. Mecánica de los fluidos. 8va edición.
- [22] kimerius.com/app/download/5784800258/Diseño+de+perfiles+aerodinámicos.pdf

ANEXOS

A. PLANOS